



## Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>  
Eprints ID : 10218

**To cite this version** : Coundoul, Falilou and Moulin, Frédéric and Bonometti, Thomas *Rôle des conditions locales d'un écoulement de couche limite turbulente dans la colonisation et la croissance d'un biofilm : approche numérique directe*. (2011) In: 20ème Congrès Français de Mécanique, 29 August 2011 - 02 September 2011 (Besançon, France).

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: [staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr](mailto:staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr)

# Rôle des conditions locales d'un écoulement de couche limite turbulente dans la colonisation et la croissance d'un biofilm : approche numérique directe

FALILOU COUNDOUL<sup>a</sup>, FRÉDÉRIC Y. MOULIN<sup>a</sup>, THOMAS BONOMETTI<sup>a</sup>

*a. Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), UMR 5502 CNRS-INP-ENSEEIH-UPS, 1 allée du Professeur Camille Soula, 31400 TOULOUSE*

## Résumé :

*Des simulations numériques directes d'une couche limite turbulente sur un fond composé d'hémisphères ont été réalisées au moyen d'une méthode de frontière immergée. Le code utilisé est d'abord validé par comparaison avec des mesures et des simulations réalisées pour un écoulement sur une surface rugueuse composée de cubes. Une simulation au-dessus d'hémisphères est ensuite présentée et comparée avec des mesures réalisées en canal hydraulique dans des expériences de croissance d'un biofilm de rivière. Les conditions locales de l'écoulement obtenues grâce à la simulation numérique devraient permettre d'interpréter la morphologie des motifs de colonisation mesurée dans les expériences en canal.*

## Abstract :

*Direct numerical simulations of a turbulent boundary layer flow over a bed of hemispheres are performed using an Immersed Boundary Method. The validity of the scheme is checked by comparison with experimental and numerical results for a flow above a bed of regular cubes. A numerical simulation for a flow above hemispheres is presented and compared with measurements performed during river biofilm growth experiments in a hydraulic flume. The local flow conditions available help to the numerical simulation will lead to a better understanding of the morphology of the colonization patches observed in the experiments.*

**Mots clefs :** couche limite turbulente, sous-couche rugueuse, méthode IBM, canopée, biofilm de rivière

## 1 Introduction

Le biofilm épilithique (anciennement périphyton), agrégat phototrophe fixé d'organismes se développant sur le fond des cours d'eau, joue un rôle essentiel dans le fonctionnement des écosystèmes fluviaux : stockage des nutriments, cycle du carbone de l'azote et ressource pour les échelons trophiques supérieurs (voir Teissier et al. [1]). Pour améliorer la modélisation des hydro-écosystèmes comme la Garonne à l'échelle du tronçon de rivière, il est donc nécessaire d'introduire un compartiment fonctionnel pour le biofilm et de bien décrire son interaction avec l'écoulement. Cela est également vrai pour améliorer la gestion de cours d'eau artificiels comme les canaux d'irrigation où la croissance de biofilm et son détachement posent de gros problèmes. A l'échelle du tronçon de rivière, l'interaction entre le biofilm et l'eau en écoulement n'était pas jusqu'ici pris en compte explicitement dans les modèles prédictifs du continuum fluvial : la croissance, la sénescence et l'arrachage du biofilm dépendent pourtant fortement des conditions hydrodynamiques locales et réciproquement, la structure, la cohésion et l'épaisseur du biofilm contrôlent la structure (champs de vitesse à l'échelle locale) de la colonne d'eau. Autour de cette question de l'interaction entre le biofilm épilithique et l'écoulement, sur la base d'études expérimentales en canal de laboratoire à l'IMFT par Moulin et al. [2] et au moyen de mesures par PIV (Vélocimétrie par Images de Particules) au-dessus d'hémisphères recouverts de biofilm, il a pu ainsi être montré que la prise en compte des caractéristiques locales de l'hydrodynamique (vitesse de frottement  $u^*$ , rugosité hydraulique  $k_s$  et hauteur de déplacement  $d$ , les paramètres de la loi log d'une couche limite turbulente de rivière) dans des modélisations classiques d'évolution de la biomasse était essentielle : cette prise en compte conduit à une meilleure prédiction que lorsque seules les grandeurs hydrodynamiques globales (débit volumique  $Q$ , vitesse moyenne  $U_m$ ) sont

considérées (voir Graba et al. [3]). Cependant, dans la phase initiale de colonisation et de croissance du biofilm, il apparaît une topologie très spécifique dans la distribution de biofilm au niveau des hémisphères, qui semble dépendre des conditions locales de l'écoulement, inaccessibles aux mesures par PIV présentées dans Moulin et al. [2] qui restent limitées à la sous-couche inertielle et la partie haute de la sous-couche rugueuse.

C'est dans cette problématique que s'inscrit le travail présenté ici. Il consistait à réaliser des simulations numériques directes d'une couche limite turbulente sur un fond composé d'hémisphères au moyen d'une méthode de frontière immergée (notée IBM pour « immersed boundary method », voir Yuki et al. [4] pour plus de détails sur la méthode implémentée ici) du code JADIM (code numérique communautaire développé à l'IMFT), en reproduisant les campagnes expérimentales menées à l'IMFT (voir [2]), de manière à accéder aux conditions locales de l'écoulement et expliquer les topologies observées lors de la colonisation par le biofilm.

Dans la première partie de cet article, nous présenterons le code numérique utilisé et la validation de la méthode IBM. Dans une seconde partie, nous discuterons les résultats de la simulation au-dessus d'hémisphères et la comparaison avec les résultats expérimentaux présentés dans Moulin et al. [2], avant de finir avec les perspectives de ce travail.

## 2 Présentation et validation de la méthode IBM

Le code JADIM utilisé dans cette étude est une méthode de type volumes finis qui résout les équations de Navier-Stokes tridimensionnelles instationnaires en présence d'objets fixes de forme quelconque (module de frontières immergées noté IBM). Le schéma numérique en temps est de type Runge-Kutta/Crank-Nicolson à trois pas. Pour plus de détails sur le code JADIM, voir Calmet [5].

Pour valider le code dans le cas d'un écoulement de couche limite turbulente sur fond hydrauliquement rugueux, une configuration identique aux expériences de Cheng et Castro [6] et aux simulations numériques directes de Coceal et al. [7] a été utilisée. Il s'agit d'un réseau décalé de cubes soumis à un écoulement turbulent avec un confinement  $\alpha=h/D$  (où  $h$  est la hauteur des cubes et  $D$  l'épaisseur de la couche limite) de 0.25 et un nombre de Reynolds rugueux  $Re=hu_\tau/\nu$  (où  $u_\tau$  est la vitesse de frottement estimée à partir du gradient de pression imposé et  $\nu$  la viscosité cinématique du fluide) de 500, avec une condition de glissement sur la frontière supérieure, des conditions périodiques pour les frontières verticales du domaine, et une vitesse nulle sur le fond et les obstacles. Une estimation de l'échelle de Kolmogorov  $\eta$  est calculée à partir de la vitesse de frottement (cf Coceal et al. [7]) de manière à étudier l'effet de la résolution spatiale du maillage par rapport cette échelle. L'échelle temporelle est adimensionnée par le temps de retournement des tourbillons, noté  $T$ , et défini par  $T=h/u_\tau$ .

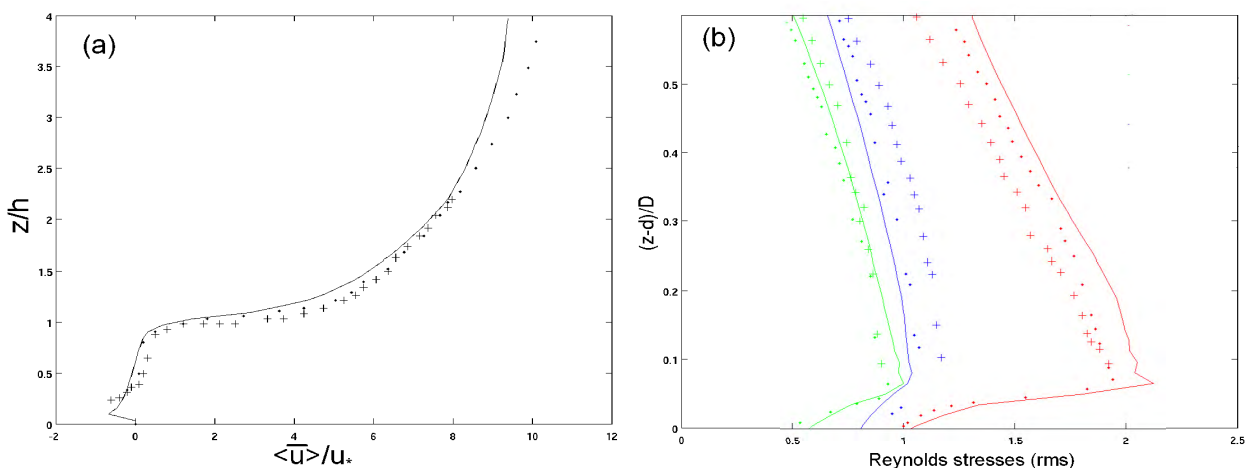


FIG. 1 – Comparaison des profils verticaux doublement moyennés de (a) la vitesse longitudinale et (b) des composantes  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{zz}$  et  $\tau_{xx}$  du tenseur de Reynolds (de gauche à droite, en vert, bleu et rouge) pour les simulations avec JADIM (lignes continues), celles de Coceal et al. 2006 [7] (points) et les mesures en soufflerie de Cheng et Castro 2002 [6] (+).

Dans la figure 1 sont tracés des profils doublement moyennés (cf Coceal et al. 2006 [7]) estimés à partir de champs instantanés obtenus tous les 1T entre 200T et 700T pour JADIM, 200T et 600T pour Coceal et al. [7], et pour les mesures expérimentales de Cheng et Castro [6]. Le maillage utilisé dans JADIM est de  $64 \times 64 \times 64$  nœuds dans les directions x (longitudinale), y (transversale) et z (verticale), ce qui correspond à une maille de  $h/16$ , soit environ  $8\eta$ , et un domaine de calcul de  $4h \times 4h \times 4h$ . La résolution de la simulation de Coceal est de  $h/64$ , soit environ  $2\eta$ , pour une même taille de domaine.

Les résultats numériques obtenus avec la méthode IBM dans JADIM sont en bon accord avec les résultats de Coceal et al. [7] et Cheng et Castro [6]. Les différences entre nos résultats et les expériences sont comparables à celles observées entre les simulations de Coceal et al. [7] malgré un maillage plus grossier. A maillage identique ( $h/16$ ), les résultats obtenus par JADIM sont plus proches des mesures expérimentales que ceux de Coceal et al. [7]. On note par ailleurs que ces différences sont observées dans la partie haute de l'écoulement, et sont moindres dans la zone de canopée (région sous le sommet des obstacles), qui est la région où se produit l'interaction écoulement - biofilm.

### 3 Ecoulement turbulent au-dessus d'hémisphères

#### 3.1 Expérience de croissance de biofilm

Pour pouvoir étudier en conditions contrôlées la dynamique d'un biofilm épilithique, un canal hydraulique de l'IMFT (11 m de long, 50 cm de large et 20 cm de profondeur) a été aménagé. C'est dans ce canal que les expériences de Moulin et al. [2] ont été réalisées, avec un fond recouvert de rugosités hémisphériques et un aménagement spécifique destiné à produire trois conditions hydrodynamiques différentes sur une même campagne de mesure. Le biofilm a été saturé en lumière et en nutriments afin de limiter l'influence de ces paramètres sur sa croissance. Les mesures de vitesse pour définir l'hydrodynamique ont été faites par vélocimétrie par images de particules (PIV). Le suivi de la colonisation et de la croissance du biofilm épilithique a été effectué par des photographies journalières et prélèvements d'eau et de biofilm (matière sèche) hebdomadaires.

Dans la figure 2, on a reproduit la photographie des hémisphères dans la zone amont quelques jours après l'introduction des organismes dans le canal, et on voit clairement apparaître une répartition hétérogène pour le motif de colonisation, très régulier comme l'atteste la ressemblance des motifs entre différents hémisphères. Une moyenne de ces motifs permet d'identifier ici une tâche en amont de l'hémisphère, et une couronne en aval. Le choix par les organismes de ces positions particulières dépend donc des conditions locales de l'écoulement qui sont à déterminer au moyen des simulations numériques. On pourra noter que ces motifs sont totalement différents dans une autre campagne d'expériences présentée dans Moulin et al. [2] pour laquelle la disposition des hémisphères par rapport à l'écoulement incident était orientée à  $90^\circ$  de la configuration discutée ici.



FIG. 2 – Colonisation par le biofilm épilithique des hémisphères dans les expériences de Moulin et al. [2]. Vue globale (à gauche) 4 jours après *inoculum* et moyenne du motif sur six hémisphères différents (à droite). L'écoulement a lieu de haut en bas sur ces images et correspond au régime LV (pour « low velocity »), soit une vitesse de frottement de  $0.85 \text{ cm s}^{-1}$  mesurée par PIV et  $Re=157$ .

Pour les conditions hydrodynamiques dans la zone amont du canal, les mesures réalisées par Moulin et al. [2] indiquent une épaisseur de la veine d'eau  $D=12.35$  cm. Les hémisphères utilisés ont un diamètre moyen de 3.7 cm et une hauteur de 1.85 cm. La vitesse de frottement mesurée expérimentalement a été obtenue en utilisant la valeur maximale du profil vertical de tenseur de Reynolds  $\tau_{xz}$  obtenu par double moyenne des mesures dans un seul plan vertical, et la valeur indiquée par les auteurs est de  $0.85 \text{ cm s}^{-1}$ .

### 3.2 Simulation numérique de l'écoulement

Le code JADIM muni du module IBM a été utilisé pour reproduire l'expérience décrite ci-dessus dans sa phase initiale (avant que la croissance du biofilm ne soit trop importante). On a utilisé un domaine de  $7h \times 8h \times 6.64h$  (avec  $h=1.85$  cm la hauteur des hémisphères) de manière à maintenir un minimum de décorrélation longitudinale et transversale, conformément aux recommandations de Coceal et al. [7] qui préconisent un domaine supérieur à  $6h$  dans la direction longitudinale et  $3h$  dans la direction transversale. Cette configuration est illustrée dans la partie gauche de la figure 3. Pour la résolution du maillage, elle a été choisie de manière à avoir une taille inférieure à  $8\eta$  et un nombre suffisant de points pour représenter les hémisphères. On a adopté une résolution de  $h/12.3 \times h/11.8 \times h/20.3$  dans les directions longitudinale, transverse et verticale, correspondant à des résolutions de  $4.6\eta \times 4.6\eta \times 2.3\eta$  par rapport à l'échelle de Kolmogorov. Les conditions limites sont identiques à celles utilisées lors de la validation (glissement sur la frontière supérieure, périodicité sur les frontières verticales, et non-glissement sur les hémisphères et le fond). Dans la simulation numérique, le forçage de l'écoulement est imposé par un gradient de pression, dont la valeur a été directement déduite de la vitesse de frottement mesurée expérimentalement ( $u^*=0.85 \text{ cm s}^{-1}$ ).

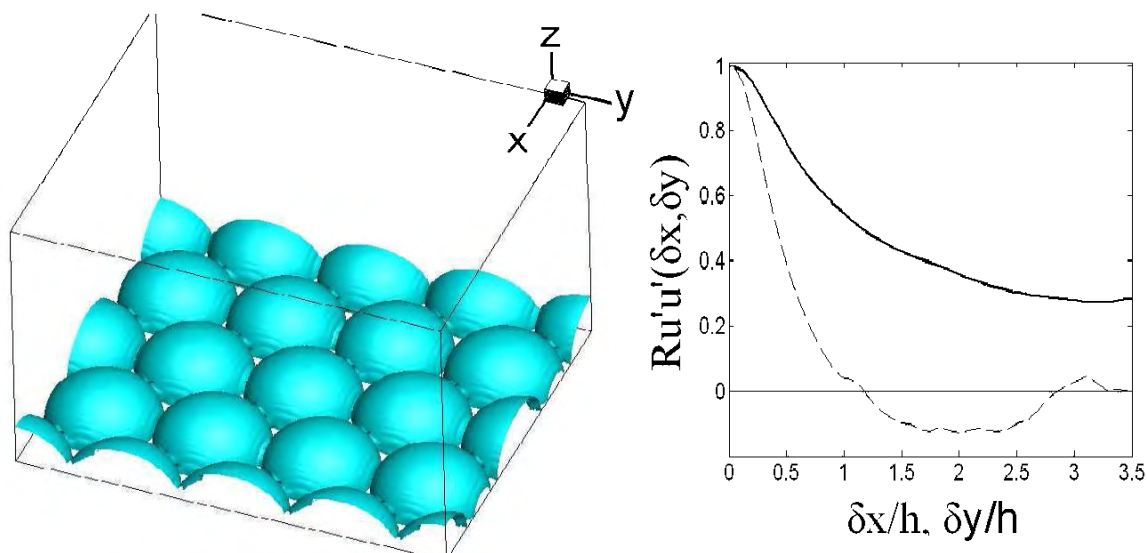


FIG. 3 – Domaine de calcul de l'écoulement au-dessus des hémisphères (à gauche) et fonctions d'autocorrélation longitudinale (trait continu) et transverse (trait tireté) calculées entre  $t=400T$  et  $500T$  à  $z=2h$  (à droite).

Les fonctions d'autocorrélation calculées pour la vitesse longitudinale et tracées dans partie droite de la figure 3 montrent que l'autocorrélation longitudinale chute à 0.3 au milieu du domaine, ce qui indique que ce dernier est tout juste suffisant pour capturer les grandes structures de l'écoulement. La décroissance est conforme aux résultats présentés par Coceal et al. [7] dans le cas d'un fond rugueux constitués de cubes. Néanmoins, l'étude de l'effet de la taille du domaine menée par ces mêmes auteurs [7] a montré que ces grandes structures modifient essentiellement la partie supérieure de l'écoulement.

La convergence temporelle de l'énergie cinétique totale  $K=u^2+v^2+w^2$  est correcte à partir de  $200T$  (voir figure 4), mais des artefacts de structures secondaires semblent persister pour une moyenne temporelle entre  $200T$  et  $500T$ , qui s'expliquent par un intervalle temporel trop restreint qui ne permet pas encore de décorréler tout-à-fait en temps les plus grandes structures, comme expliqué dans Coceal et al. [7]. Un intervalle de temps plus grand permettrait de faire disparaître cet effet dû à un manque de convergence temporel.



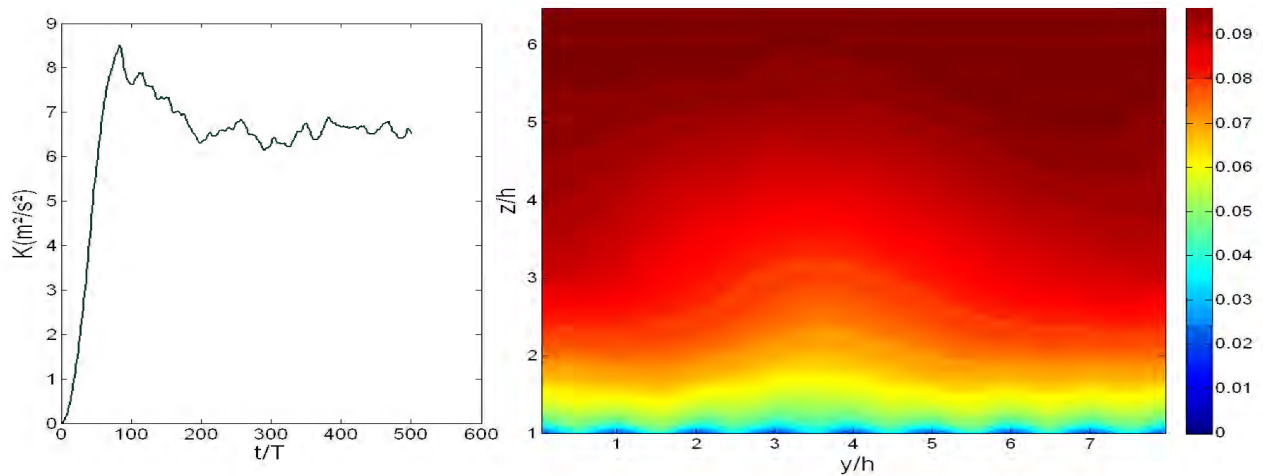


FIG. 4 – Evolution temporelle de l'énergie cinétique totale  $K=u^2+v^2+w^2$  (à gauche) et valeurs de la vitesse longitudinale moyenne dans un plan perpendiculaire à l'écoulement (à droite) faisant apparaître une structure secondaire du fait d'un manque de convergence temporel. Dans le second cas, la vitesse longitudinale est moyennée selon  $x$  et selon le temps entre  $t=200T$  et  $t=500T$ .

### 3.3 Comparaison des profils verticaux au dessus de la canopée

Si on compare directement les profils verticaux doublement moyennés obtenus dans les expériences pas PIV et par simulation numérique, adimensionnés par la vitesse de frottement pour les grandeurs turbulentes, il apparaît immédiatement une nette différence entre les simulations et les expériences. Cependant, cette différence s'explique principalement par le choix de prescrire le gradient de pression de la simulation numérique au moyen de la vitesse de frottement  $u^*$  expérimentale obtenue à partir du maximum du tenseur de Reynolds dans les expériences. Comme expliqué dans Florens [8], la vitesse de frottement ainsi définie est bien le paramètre pilotant les profils de loi log et de grandeurs turbulentes au-dessus de la canopée, mais c'est au contraire l'extrapolation de la droite linéaire que forme le tenseur de Reynolds jusqu'au fond qui mesure le frottement pariétal. Autrement dit, le frottement pariétal dans les expériences est en réalité supérieur à la valeur calculée à partir de  $u^*$  calculé en  $z=h$ , et il faut prendre en fait le prolongement du profil vertical de tenseur de Reynolds mesuré expérimentalement jusqu'en  $z=0$ . Quant au caractère bombé du profil expérimental vers le bas, il naît probablement d'un sous-échantillonnage spatial et/ou d'une mauvaise résolution des mesures, comme expliqué dans Florens [8], et génère une source supplémentaire d'imprécision sur  $u^*$ .

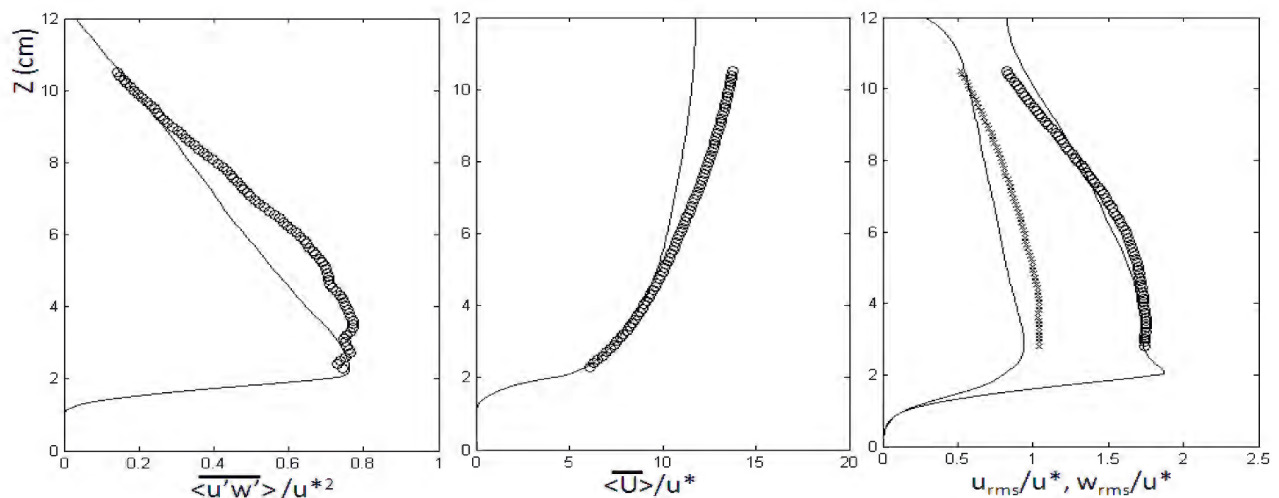


FIG. 5 – Profils verticaux de vitesse longitudinale et composantes du tenseur de Reynolds dans la simulation numérique et dans l'expérience de Moulin et al. [2]. L'adimensionnement a été effectué au moyen de  $u^*=0.85$  pour les données numériques (tracées en lignes continues), et avec  $1.15u^*$  pour les données expérimentales (tracées avec des symboles) conformément à ce qui est expliqué dans le texte.

Pour palier à cette différence de configuration réelle entre expérience et simulation numérique, on a tracé dans la figure 5 les profils verticaux des grandeurs doublement moyennées pertinentes (vitesse longitudinale, rms du tenseur de Reynolds et tenseur de Reynolds) en multipliant toutes les données expérimentales par un facteur 1.15 (et 1.15<sup>2</sup> pour le tenseur de Reynolds), ce qui correspond au facteur nécessaire pour que les valeurs extrapolées en  $z=0$  des deux profils de tension de Reynolds (numérique et expérimental) correspondent. Les différentes courbes de vitesse longitudinale et des grandeurs turbulentes correspondent alors beaucoup mieux, même si un désaccord de l'ordre de 16% pour la vitesse longitudinale persiste dans la partie haute de l'écoulement, de toutes manières mal convergé temporellement (cf sous-section précédente).

## 4 Conclusion et perspectives

L'implémentation d'un module IBM dans le code JADIM développé à l'IMFT a permis de réaliser une simulation numérique dans des conditions semblables à celles d'une expérience menée à l'IMFT en canal hydraulique pour étudier l'interaction entre un biofilm de rivière et un écoulement turbulent. Il apparaît que les données numériques et expérimentales sont en bon accord dans la partie proche de la canopée, à savoir dans la sous-couche rugueuse et inertielle, à condition d'adopter la bonne représentation pour la valeur de la vitesse de friction  $u^*$  qui ne doit pas être calculée à partir du gradient de pression dans les simulations numériques. Dans la partie haute, un écart plus important est observé du fait d'une mauvaise représentation des grandes structures de l'écoulement.

En ce qui concerne la simulation présentée ici, une étude des conditions locales près de l'hémisphère est en cours pour exploiter ces données numériques pour interpréter la morphologie de la répartition de biofilm pendant la colonisation. L'autre morphologie observée dans Moulin et al. [2] pour un écoulement orienté à 90° par rapport à la distribution d'hémisphères utilisée ici sera également étudiée par le biais de simulations numériques calées sur l'expérience.

## References

- [1] Teissier S., Torre M., Delmas F. et Garabétian F. Detailing biogeochemical N budgets in riverine epilithic biofilms. *J. N. Am. Benthol. Soc.*, 2007, 26(2):178–190, 2007.
- [2] Moulin F., Peltier Y., Bercovitz Y., Eiff O., Beer A., Pen C., Boulêtreau S., Garabétian F., Sellali M., Sanchez-Perez J., Sauvage S. et Baquet D. Experimental study of the interaction between a turbulent flow and a river biofilm growing on macrorugosities. *Proceedings of the 8th International Conference on Hydro-science and Engineering, ICHE2008*, 8-12 septembre 2008, Nagoya, Japon, 2008.
- [3] Graba M., Moulin F., Boulêtreau S., Garabétian F., Kettab A., Eiff O., Sanchez-Perez J.M. et Sauvage S.. Dynamics of epilithic biofilm biomass in artificial rough, open-channel flow: Experimental and modeling approaches. *Water Resour. Res.*, doi:10.1029/2009WR008679, in press.
- [4] Yoshihiko YUKI, Shintaro TAKEUCHI and Takeo KAJISHIMA. Efficient Immersed Boundary Method for Strong Interaction Problem of Arbitrary Shape Object with the Self-Induced Flow *Journal of Fluid Science and Technology*. Vol. 2 (2007) , No. 1 pp.1-11. 2004.
- [5] Calmet I., Analyse par simulation des grandes échelles des mouvements turbulents et du transfert de masse sous une interface plane, thèse INPT, 1995.
- [6] Cheng, H. & Castro, I. P. 2002 Near wall flow over urban-like roughness. *Boundary-Layer Met.* 104, 229-259
- [7] O. Coceal, T. G. Thomas, I. P. Castro, S. E. Belcher. 2006 Mean flow and turbulent statistics over groups of urban-like cubical obstacles. *Boundary-Layer Met.*
- [8] Florens E. Couche Limite Turbulente dans les Écoulements à Surface Libre : Étude Expérimentale d'Effets de Macro Rugosités. Thèse UPS 2010.